

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С СОЕДИНЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ GaAs/Al_xGa_{1-x}As

В. Н. Мищенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
E-mail: mishchenko@bsuir.by

Исследование электронного транспорта в полевых транзисторах с соединением элементов GaAs/Al_xGa_{1-x}As, которое приводит к формированию двумерного электронного газа с высокой подвижностью электронов, вызывает особый интерес, связанный с увеличением рабочей частоты, улучшением выходных параметров приборов диапазона КВЧ. Для анализа процессов переноса электронов в гетероструктурных приборах обычно используется процедура решения уравнения Шредингера совместно с решением уравнения Пуассона [1, 2]. Применяя метод Монте-Карло, можно исследовать процессы переноса электронов в различных областях полупроводниковой структуры. Использование таких структур способствует разработке и внедрению транзисторов и других приборов, работающих в диапазоне КВЧ и более высокочастотных диапазонах.

Известно, что, если на поверхности нелегированного GaAs вырастить слой легированного Al_xGa_{1-x}As, у границы их раздела вследствие разницы величин электронного сродства материалов формируется двухмерный 2D-электронный газ [1-4]. Движение электронов 2D-газа квантовано в направлении, перпендикулярном плоскости гетероперехода, и при этом возникают размерные энергетические уровни или подзоны электронов, характеризующие потенциальную яму. Волновая функция ψ_i вдоль поперечной оси z удовлетворяет уравнению Шредингера:

$$\frac{\eta^2}{2m} \frac{d^2 \psi_i}{dz^2} + [\epsilon_i - U(z)] \psi_i = 0, \quad (1)$$

где m – эффективная масса электрона в зоне проводимости, ϵ_i – квантованная энергия электрона на дне i -й размерной подзоны, а $U(z)$ – потенциальная энергия, соответствующая изгибу зоны у границы раздела [1, 2]. Потенциальную энергию находят из решения уравнения Пуассона

$$\frac{d^2 U}{dz^2} = \rho(z) / \epsilon. \quad (2)$$

Плотность пространственного заряда определяется концентрацией электронов у границы гетероперехода и легированием материала:

$$\rho(z) = q(N_{D1} - N_{A1}) - q \sum_{i=0}^{\infty} n_i |\psi_i(z)|^2, \quad (3)$$

$$n_i = \left(mkT / (\pi \eta^2) \right) \ln \{ 1 + \exp [q(\epsilon_F - \epsilon_i) / kT] \}, \quad (4)$$

здесь m – масса электронов, ϵ – диэлектрическая проницаемость материалов, формирующих гетеропереход, N_{A1} N_{D1} – концентрация ионизованных акцепторов и доноров

в этом слое, ε_F – уровень Ферми, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, η – постоянная Планка, T – температура.

Для интегрирования уравнения Шредингера был использован метод Нумерова. Опираясь на этот метод, разработана программа моделирования процессов переноса электронов в полупроводниковом приборе, имеющего соединения материалов GaAs/Al_xGa_{1-x}As, на основе решения уравнений Шредингера и Пуассона. Основной особенностью этой программы является наличие итерационной процедуры совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона для потенциальной ямы гетероструктуры. Если разность значений между предыдущим и последующим значениями потенциальной энергии не достигает установленного значения, то заново решается уравнение Шредингера с новым значением потенциальной энергии, найденным на предыдущем шаге. При достижении заданной разности между предыдущим и последующим величинами потенциальной энергиями формируется выход из итерационной процедуры и фиксация результатов расчета. При расчете потенциальной энергии вблизи гетероперехода учитывались значения обменно-корреляционного потенциала, потенциала отбражения и потенциала, описывающего характер разрыва зоны проводимости на границе материалов GaAs и Al_xGa_{1-x}As. Рассматривались следующие механизмы рассеивания электронов в двухмерном газе: на полярных оптических фононах, на акустических фононах, на ионизированной примеси и др. [1, 2]. В остальной части структуры учитывалось рассеивание на акустических и полярных оптических фононах, на ионизированной примеси и все виды междолинных рассеиваний при использовании модели состоящей из трех долин G-X-L.

Используя метод Монте-Карло, описанный в [5], были исследованы процессы переноса электронов в гетероструктуре, образованной соединением материалов GaAs/Al_xGa_{1-x}As при величине молярной доли алюминия $x = 0,3$ и температуре $T = 77$ К. Значения параметров моделирования были выбраны следующими: длина структуры вдоль оси x (продольная координата) – 0,1 мкм, длина структуры вдоль оси z (поперечная координата) – 0,1 мкм. Длина затвора, стока и истока составила величину 0,02 мкм. Затвор располагался на расстоянии 0,04 мкм от истока. Толщина слоя Al_xGa_{1-x}As составила 0,02 мкм, толщина слоя GaAs – 0,08 мкм, концентрация электронов в нелегированных слоях – $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Выполнено моделирование описанной полупроводниковой структуры при значениях напряжений на затворе $U_g = 0$ В и стоке – $U_d = 0,72$ В. Зависимость подвижности электронов в области структуры под затвором, т. е. для значения координаты $x = 0,04\text{--}0,06$ мкм и для значений координаты $z = 0\text{--}0,1$ мкм, представлена на рис. 1. Средняя величина подвижности электронов составила величину $1,44 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Данное значение подвижности электронов близко к экспериментально измеренному для НЕМТ транзистора при температуре $T = 77$ К значению $1,65 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [3]. Однако эта структура имела некоторые отличия от моделируемой структуры. В частности, толщина Al_xGa_{1-x}As слоя составила 0,1 мкм при концентрации $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина буферного слоя Al_xGa_{1-x}As слоя равнялась 15 нм, а общая толщина структуры составляла приблизительно 0,9 мкм [3]. Близкие значения подвижности электронов $(1,5\text{--}1,6) \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, также были получены теоретически для GaAs/Al_xGa_{1-x}As структуры при толщине буферного слоя в 20 нм [4], однако другие конструктивные размеры структуры не представлены. Подвижность такой структуры в области комнатных температур ($T = 300$ К) обычно теоретически прогнозируется не выше $(5\text{--}7) \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что намного меньше, чем при температуре $T = 77$ К.

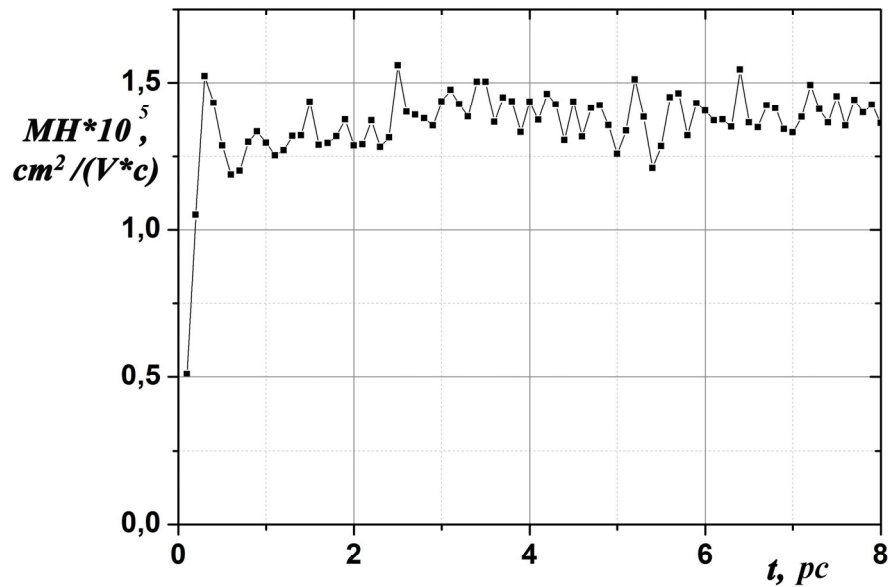


Рис. 1. Зависимость средней величины подвижности электронов от времени моделирования

Разработана программа моделирования переноса электронов в гетероструктурном приборе на основе соединения GaAs/Al_xGa_{1-x}As, используя процедуру совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Определены основные выходные параметры транзистора при величине молярной доли алюминия $x = 0,3$ и температуре 77 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шур, М. Современные приборы на основе арсенида галлия: Пер. с англ. / М. Шур – М.: Мир, 1991. – 632 с., ил.
2. Yokoyama K., Hess K. Monte Carlo study of electron transport in GaAs-Al_xGa_{1-x}As single-well heterostructures / K. Yokoyama, K. Hess // Physical Review B., V. 33, N. 8, 1986, P. 5595-5606.
3. Hiyamizu S., Satio J., Nanbu K., Improved Electron Mobility Higher than 106 cm²/Vs in Selectively Doped GaAs/N-AlGaAs Heterostructures Grown by MBE / S. Hiyamizu, J. Satio, K. Nanbu // Japanese Journal of Applied Physics, V. 22, No. 10, October 1983, pp. L609-L611.
4. Walukiewicz W., Ruda H. E., Lagowski J., and Gatos H. C., Electron mobility in modulation-doped heterostructures / W. Walukiewicz, H. E. Ruda, J. Lagowski, and H. C. Gatos // Physical Rev., V. 30, N. 8, October 1984, p. 4571-4582.
5. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: пер с английск./ Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.